

IL PROGETTO DELLA NUOVA GALLERIA DEL COL DI TENDA

Antonio Valente - ANAS - *Vicedirettore Direzione Centrale Progettazione*

Alessandro Micheli - ANAS - *Responsabile di U.O. Geotecnica e Impianti*

Luca Cedrone - ANAS - *Responsabile Opere in Sottterraneo*

Salvatore Papale - ANAS - *Responsabile di Progetto*

Abstract

Il valico del Col di Tenda è stato sempre un "passaggio" fondamentale; dai tempi della Repubblica di Roma ai giorni nostri le esigenze di traffico si sono evolute e da una pista di superficie si è passati a un traforo carrozzabile alla base del colle. Questo, dopo oltre un secolo di storia, è giunto al termine della sua vita utile ed è il momento di adeguarlo alle esigenze di sicurezza imposte dall'attuale circolazione stradale. Dopo alcuni cenni storici riguardanti la regione del Colle di Tenda, i trafori esistenti e i metodi di scavo utilizzati, verrà presentato il progetto definitivo con descrizione degli studi, delle indagini, delle analisi effettuate e delle scelte effettuate sulla base delle problematiche progettuali che si sono presentate.

1. LA STORIA DEL COLLEGAMENTO STRADALE

1.1 Introduzione

Della lunga dorsale appenninica che costituisce il confine naturale che separa l'Italia con la Francia, il valico del Tenda, posto a quota 1873 metri, rappresenta il passaggio meno elevato.

Già identificato come un punto di delimitazione tra la Gallia Cisalpina e la Gallia Narbonense durante la Repubblica Romana, il Colle di Tenda trova la prima menzione su un documento storico nel 1178, a proposito delle tappe che un viandante poteva incontrare lungo i sentieri che collegavano Ventimiglia a Borgo San Dalmazzo.

Questi sentieri, nei secoli, furono battuti dai pellegrini diretti a Santiago de Compostela ma soprattutto era questa la strada del sale che dalla valle Roya, attraverso il passo di Tenda, metteva in comunicazione le saline del mediterraneo con le pianure del Piemonte.

Il periodo a cavallo tra la metà del 1800 e i primi del 1900 fu florido per quanto riguarda lo scavo di gallerie, soprattutto grazie all'espansione della rete ferroviaria europea che richiese l'attraversamento di catene montuose come le Alpi. In questo periodo fu realizzato: il traforo stradale del Colle di Tenda.

Grazie alla rivoluzione industriale, a metà '800, vennero realizzati i grandi trafori alpini, in particolare il Regno di Savoia, in pieno sviluppo economico, diede l'impulso all'ideazione di un collegamento diretto tra Torino e la Francia con il traforo del Moncenisio (Frejus), cui seguirono, tra gli altri, quelli del Tenda, del San Gottardo e del Sempione (figura 1).

Nel 1873 il Parlamento Italiano votò un credito straordinario e fu approvato il progetto per la realizzazione dell'attuale tunnel dell'ingegner Delfino. I lavori terminarono nel 1882; il tunnel fu realizzato all'altezza di 1320 m dalla parte di Limone Piemonte e di 1279 m sul lato dell'abitato di Tenda. All'epoca della sua inaugurazione era il tunnel stradale più lungo mai costruito con la ragguardevole lunghezza di 3.182 metri.

Nel 1898 fu ultimato anche il tunnel ferroviario, molto più lungo di quello stradale (8.099 metri) e a esso parallelo ma realizzato a quota più bassa di circa 300 m. Gli scavi di questo traforo, iniziati nel 1889, furono effettuati dapprima a mano, in seguito, dopo la realizzazione degli impianti per l'aria compressa con perforatrici Ferroux modificate.



1	Col di Tenda	Stradale	3182 m	1873 - 1882
		Ferrovio	13600 m	1857 - 1871
2	Frejus (Moncenisio)	Stradale	12900 m	1974 - 1980
		Ferrovio	11600 m	1956 - 1965
3	Monte Bianco	Stradale	5800 m	1958 - 1964
4	Gran San Bernardo	Stradale	5800 m	1958 - 1964
		Ferrovio	19800 m	1898 - 1906
5	Sempione	Ferrovio	19800 m	1912 - 1921
		Stradale	6600 m	1961 - 1967
6	San Bernardino	Stradale	6600 m	1961 - 1967
		Ferrovio	16900 m	1970 - 1980
7	San Gottardo	Stradale	15500 m	1872 - 1882
		Ferrovio	57000 m	1999 -
		Ferrovio	14600 m	1906 - 1913
8	Loetschberg	Ferrovio	34600 m	1999 - 2007
		Ferrovio	56000 m	In prog.
9	Brennero	Ferrovio	56000 m	In prog.

Figura 1 - Grandi trafori alpini

1.2 Il collegamento di superficie dal I al XVIII secolo

Il passo del Colle di Tenda è uno dei tracciati più antichi, già utilizzato dai pastori transumanti del medioevo e densamente percorso all'epoca romana (figura 2), poiché era quello che più direttamente collegava il mare della Provenza alle pianure del Piemonte, scavalcando le Alpi. Della sua importanza ne sono testimonianza le numerose fortificazioni militari presenti.

Nel Medioevo la Contea di Tenda era un piccolo stato indipendente, retto dalla signoria dei Lascaris, ramo della famiglia dei conti di Ventimiglia, che governò dalla metà del Duecento alla fine del Cinquecento, riuscendo a destreggiarsi tra vicini potenti (Angioini e Savoia) grazie a un'intelligente trama di rapporti politici e di parentela.



Figura 2 - Antica strada romana

A metà del duecento quando i conti Pietro Balbo e Guglielmo Pietro di Ventimiglia crearono il vero e proprio stato indipendente della Contea di Tenda, costruendo il castello, di cui ora non si vedono che le rovine sovrastanti l'abitato della cittadina, Guglielmo Pietro, che ottenne in sposa nel 1269 la potente Eudossia Lascaris, figlia dell'imperatore d'Oriente, acquisì il diritto di tramandare ai propri discendenti il nome e lo stemma dei Lascaris. La parte principale della Contea era costituita dai comuni di Tenda, Briga, Limone e Vernante, e diversi altri possedimenti quali Maro, Prelà e Castellar. A Vernante e Briga (oggi La Brigue) sono ancora visibili i resti dei castelli appartenuti ai signori di Tenda. Il centro, non solo geografico, della Contea era rappresentato dal Colle di Tenda, punto fondamentale di passaggio per le popolazioni al di qua e al di là delle Alpi, nonché per il trasporto delle merci; tanto che i Lascaris derivavano gran parte del loro potere economico e politico dalle gabelle che ponevano sui passaggi del Colle. Sotto Onorato il Grande, a metà del quattrocento, la Contea raggiunse il massimo momento di espansione e di splendore, contrastando efficacemente le mire dei Savoia che tramavano per raggiungere il controllo della Contea. Nel 1388 il "Conte Rosso" Amedeo VII acquisì la contea di Nizza, fornendo ai domini sabaudi lo sbocco sul mare e in quest'occasione i Savoia riuscirono anche ad acquisire alcuni diritti su Limone e Briga, ma ciò non li distolse dal disegno di impadronirsi dell'intera Contea di Tenda, per poter così assicurare la libera circolazione degli uomini e delle merci tra Nizza e Piemonte.

I Savoia tentarono anche di costruire e migliorare altre vie di comunicazione attraverso le valli Gesso e Vésubie che tuttavia, essendo caratterizzate da luoghi e passaggi più impervi, non permettevano transiti agevoli. Nel 1501 i Savoia riuscirono a porre le basi per impossessarsi dei territori della Contea, grazie al venir meno dei discendenti dei Lascaris, fatto che rese possibile il matrimonio tra la contessa Anna di Tenda e Renato, detto "Il Gran Bastardo di Savoia". Per l'annessione definitiva della Contea i Savoia dovettero attendere fino al 1581, durante il ducato di Emanuele Filiberto. Nel mese di settembre del 1784 si ha notizia del primo transito in carrozza a percorrere la pista di valico conclusa, la stessa che servì ai rivoluzionari francesi nel 1794 quando passarono il confine per invadere il Regno di Sardegna.

1.3 Il collegamento in galleria dal XVII al XX secolo

L'importanza del Colle di Tenda si evince chiaramente dal fatto che il duca Carlo Emanuele I di Savoia fece iniziare i lavori di miglioramento della via nello stesso anno di annessione della contea; Nel 1614 inoltre diede inizio agli scavi, tuttora visibili, della galleria che avrebbe dovuto abbreviare il tragitto del Colle. Le operazioni di scavo furono ritentate in fasi successive con scarsi risultati (figura 3). Nell'anno 1633 una relazione inviata dall'auditore Buonfiglio al duca di Savoia con un aggiornamento dei lavori effettuati e delle spese sostenute descrive com'erano stati scavati solo pochi metri di galleria, nella nota l'auditore proponeva poi di tentare un nuovo scavo in un'altra zona del colle, cioè dalla parte di San Lorenzo: *"il buco e la strada sarebbero più sicuri, più brevi, più utili e più corto il tempo a finire tutto...se al primo buco sono necessari nove anni per finirlo, a questo basteranno tre, come lo dice l'ingegnere che ne è praticissimo"*.

Solo con l'Unità d'Italia l'opera fu finalmente realizzata. Nel 1873 il Parlamento Italiano votò infatti un credito straordinario e fu approvato il progetto per la realizzazione dell'attuale tunnel dell'ingegner Giovanni Delfino. Nel 1882, grazie alla mole di studi geologici e geografici compiuti per i tentativi di scavo precedenti, il traforo fu ultimato.



Figura 3 - Primi tentativi di scavo

Lungo 3182 metri, si apre a 1321 metri s.l.m., a poca distanza dal bivio per Limonetto, e termina a poca distanza da Viève (Vievola), a quota 1280. Lo scavo venne eseguito con perforazione manuale dei fori di sparo, per mezzo di fioretti sostenuti da due operai, e avanzamento con esplosivi. In figura 4 è riportata una sezione tipo del traforo stradale esistente.

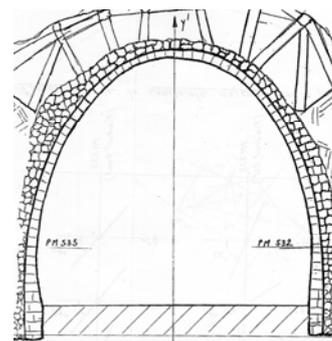
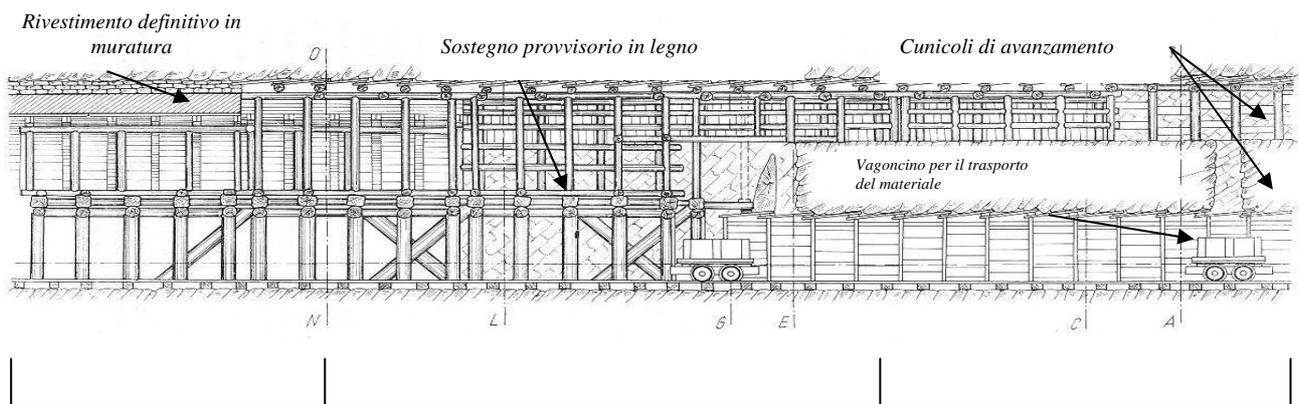


Figura 4 - Sezione tipo tunnel esistente

Pochi anni dopo, dal 1889 al 1898, furono portati a termine anche i lavori per la realizzazione della galleria ferroviaria Limone – Vievola, della linea Cuneo-Tenda-Nizza. I lavori di entrambi i trafori furono completati a costo di enormi difficoltà e ripetute soste dovute a imprevisti geologici. La galleria ferroviaria fu perforata all'incirca sullo stesso piano verticale del tunnel stradale, ma a una quota inferiore di circa 290 m.

Le vicissitudini dello scavo dei due tunnel furono ampiamente descritte nei lavori di L. Baldacci e S. Franchi e di F. Sacco, in cui sono evidenziate le repentine variazioni geologiche e strutturali che causarono notevoli ritardi nel completamento dei lavori, soprattutto nei riguardi del tunnel ferroviario che fu per numerosi mesi bloccato da cospicue venute d'acqua, sfornellamenti causati dalla mancanza di adeguato autosostegno di alcuni litotipi attraversati (principalmente nel versante Sud: carniole localmente pulverulente o fangose, zone fortemente tettonizzate riempite di breccia e materiali fangosi), ed elevate deformazioni (in particolare nel complesso anidritico). Per superare le zone dove si manifestarono le venute d'acqua maggiori (progressiva 2469 m dall'imbocco Nord) furono scavati cunicoli scaricatori per provvedere all'allontanamento delle acque. Tali interventi richiesero tre anni di lavoro e lo scavo della galleria principale, interrotto nell'autunno del 1893, fu ripreso nel settembre del 1896.

Lo sfornellamento più grave si ebbe alla progressiva 1625 m dall'imbocco Sud, il 29 settembre 1893. La perforazione si dovette



Realizzazione sostegno definitivo

Allargamento della sezione e realizzazione sostegno provvisorio

Scavo e sgombero del materiale

Figura 5 – Profilo longitudinale di un cantiere

sospendere per forti infiltrazioni e scariche di acqua torbida e melma fangosa. L'avanzamento in questa zona fu molto lento e difficoltoso e quando le difficoltà del lavoro divennero insormontabili con i mezzi ordinari si tentò di aprire cunicoli laterali allo scopo di attirare le acque che impregnavano la massa melmosa nel tentativo di prosciugarla. Durante lo scavo di questi cunicoli avvennero molti franamenti l'ultimo dei quali è datato 15 ottobre 1894 e spinse il materiale franato per oltre 50 m dal fronte di avanzamento ostruendo gli scavi e travolgendo le armature. Si valutò in circa 3000 metri cubi il volume di materiale solido che invase lo scavo.

Alla luce di quest'ultimo evento l'ispettorato generale delle strade ferrate costituì una commissione allo fine di eseguire una ricognizione geognostica per avere un'idea più precisa dei provvedimenti da prendere per superare questa zona. Le indagini eseguite permisero di valutare in circa 30 m l'estensione di questa sacca di materiale melmoso (stima in seguito confermata dallo scavo). Diverse possibilità tra i sistemi di perforazione furono inoltre valutate prima di riprendere i lavori poiché si decise di attraversare in ogni modo questa zona e fu respinta l'idea di cambiare il tracciato che avrebbe comportato l'abbandono di un lungo tratto di galleria: fu valutato l'impiego dell'aria compressa, del consolidamento tramite iniezioni di cemento a presa rapida e il congelamento (all'epoca pratiche pionieristiche). Alla fine si preferì il metodo belga, che prevedeva di eseguire lo scavo per parti limitate dell'intera sezione e il loro immediato rivestimento e solo in seguito si eseguiva lo scavo e la murazione dei piedritti facendo gravare il peso sulla volta in parte sul terreno in parte sul rivestimento realizzato erigendo la muratura dei piedritti solo per brevi sezioni. "I lavori di ripresa della galleria riattivati il 01 dicembre 1894 ebbero dopo aspra lotta lieto risultato" poiché la zona fu superata e la perforazione raggiunse di nuovo lo gneiss il 6 maggio 1895. Non sono segnalati altri avvenimenti di tale importanza e l'incontro fra il tratto perforato dall'imbocco Sud e quello perforato dall'imbocco Nord s'incontrarono il 13 febbraio 1898 alla progressiva 3090 dall'imbocco sud con grande precisione.

Il 25 aprile 1945 il tunnel e il colle furono catturati dalle milizie di Francia Libera, che mettevano per la prima volta piede sul suolo italiano dopo avere scacciato le ultime compagini della Wehrmacht dalla valle Roya.

Nel settembre 1947 l'entrata in vigore dei Trattati di Parigi spostarono il confine tra Italia e Francia verso nord, consegnando a quest'ultima Briga, Tenda e la gran parte del Colle, tra cui l'intero complesso dei forti.

1.4 Lo scavo delle gallerie

Il passo seguente è tratto dalla relazione dell'anno 1863 della Direzione Tecnica del traforo del Moncenisio alla Direzione Generale delle Strade Ferrate, in cui l'ingegner Germain Sommeiller descrive l'ambiente che un osservatore si troverebbe

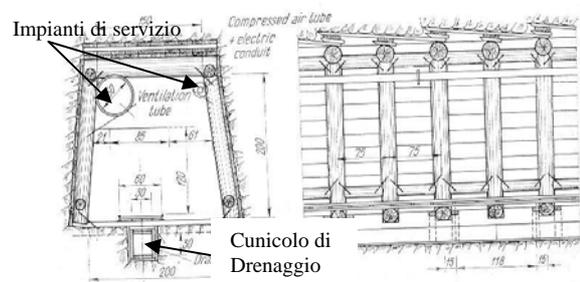


Figura 6 - Cunicolo di avanzamento

ad attraversare qualora entrasse in galleria e la percorresse in tutta la lunghezza fino al punto in cui è sito il fronte di scavo:

[...] "In generale essa si mostra divisa in tre parti distinte: la prima parte è già rivestita e completamente ultimata. Segue la seconda tratta in cui si eseguono i lavori di allargamento; in questa tratta, frammezzo ad una selva di legnami formanti le armature per i rivestimenti, i puntellamenti alla roccia, ed i ponti di servizio, lavorano i minatori all'allargamento della sezione, i muratori all'innalzamento dei piedritti, gli armatori al puntellamento della roccia minacciante, i legnaiuoli all'erezione delle centine, ed altre squadre di muratori ai volti di rivestimento; e tutti questi differenti arteri s'avanzano quasi sempre nello stesso ordine e misura dell'avanzamento totale del lavoro" [...] "Oltrepassata questa tratta, si entra nel cunicolo di avanzamento, questa galleria è come una breccia aperta nella roccia per rendere più facile l'escavazione in grande sezione, ed è dall'avanzamento ottenuto in essa che dipende la celerità ottenibile in tutti i lavori che seguono". [...]

A corredo di quanto riportato dall'ingegner Sommeiller si riportano alcune immagini che descrivono efficacemente le modalità di avanzamento degli scavi così come venivano condotti all'epoca. In figura 5 è riportato un tipico cantiere di scavo di una galleria, mentre in figura 6 è riportato un esempio di cunicolo di avanzamento.

Come si evince dalle immagini, l'armamento consisteva di telai, in genere di legno di pino, realizzati in maniera differente in funzione dello stato tensionale incontrato: si andava da semplici telai realizzati con l'unico scopo di proteggere i minatori dallo spalling (distacco gravitativo di singoli blocchi) della roccia in ammassi di buona qualità, a telai più ravvicinati o addirittura doppi (con un telaio più interno) in ammassi molto spingenti.

Si usavano inoltre dei tavoloni di 6 - 8 cm di spessore, detti marciavanti, che erano spinti nel terreno per una lunghezza sufficiente a garantire la stabilità della calotta in prossimità della zona di avanzamento (presostegno), in maniera analoga ai

moderni ombrelli di infilaggi. In figura 7 è riportato un dettaglio della zona del fronte di un cunicolo.

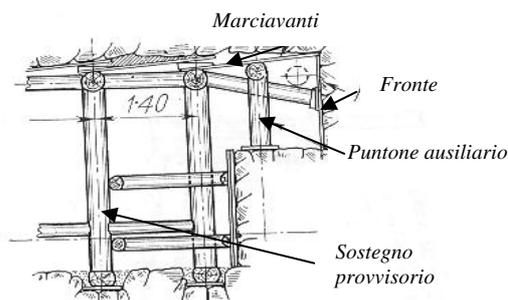


Figura 7 – Fronte di un cunicolo di avanzamento

Alle spalle dei cunicoli altre squadre di minatori lavoravano all'allargamento della sezione, e di seguito squadre di carpentieri e armatori puntellavano la roccia ed erigevano il sostegno provvisorio in legno, la configurazione di tali armature era legata principalmente al tipo di roccia: quasi del tutto assente per rocce di ottima qualità e molto resistente, molto pesante per terreni sciolti. Al tipo e alla quantità di armamento necessario era legata la velocità di avanzamento dello scavo (nel caso del traforo del Sempione per superare un tratto di 42 metri di terreno incoerente s'impiegò circa un anno e si dovette far ricorso anche ad armature metalliche!). In figura 8 è riportata la sequenza di scavo della sezione di una galleria.

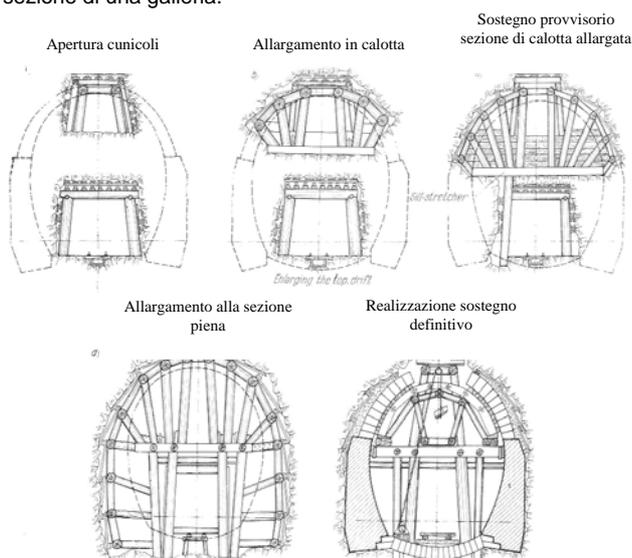


Figura 8 – Sequenza fasi di scavo

A tergo si trovava il tratto di cantiere in cui i muratori realizzavano il rivestimento definitivo in muratura, che poteva essere realizzato in un'unica fase, dopo aver scavato un anello di 3 – 6 m di galleria a piena sezione, oppure in più fasi scavando e rivestendo piccole porzioni della sezione nei casi in cui non era garantito sufficiente auto sostegno. Ancora dietro vi era il tratto di galleria completato. Le moderne tecnologie di scavo, nella sostanza analoghe a quelle dell'epoca, differiscono ovviamente per le tecnologie impiegate: lo scavo si esegue a piena sezione e senza parzializzazione dello stesso, non si applicano più i marciavanti per garantire la stabilità del fronte ma si opera con interventi di precontenimento e preconsolidamento, il sostegno provvisorio non è più costituito da una "selva di legnami" ma da centine in acciaio e calcestruzzo proiettato, il rivestimento definitivo non è più in muratura ma in calcestruzzo gettato in opera o in conci prefabbricati, non si scava più a mano con fioretti o picconi, ma con mezzi meccanici quali frese o martelli pneumatici, fino ad arrivare all'utilizzo di TBM (Tunnel Boring Machine), che rappresentano il massimo livello di industrializzazione dello scavo di una galleria.

1.4 Il tunnel attuale al termine della sua vita utile

Il tunnel del Tenda necessita oggi di profondi interventi di ammodernamento principalmente per tre motivi: il primo riguarda il miglioramento delle condizioni di sicurezza dell'esercizio di cui il collegamento ha estremo bisogno, il secondo è rappresentato dall'inadeguatezza della sagoma limite che non consente il transito nei due sensi di mezzi pesanti, il terzo riguarda la vetustà strutturale, tanto che vari dissesti hanno iniziato a manifestarsi dalla metà del secolo scorso. Tra i più gravi si rammentano notevoli crolli del rivestimento in calotta nel tratto francese nel 1956 (tra la progressiva 317 e 353 m) e nel 1972 (in prossimità della progressiva 1420 m), oltre a crolli di minore entità. Alcuni tratti di rivestimento non sono più in muratura ma in calcestruzzo (tra le progressive 0 – 74,5 m, 317 e 353 m), alcune zone presentano una rete di contenimento in volta (praticamente tutto il tratto tra la progressiva 1020 e 1485 m) e una zona (tra la progressiva 1420 e la progressiva 1430 m) è sostenuta con 16 centine in acciaio (tutte le progressive sono riferite all'imbocco lato Francia).

Dopo l'ultimo incidente (distacco di un blocco della volta caduto su un'automobile), avvenuto nel 1972 furono avviate una serie di indagini molto accurate, inizialmente da parte dei francesi, essendo gran parte dei dissesti avvenuti nel loro tratto, ed in seguito anche da parte italiana.

A seguito delle indagini svolte e delle ispezioni effettuate in galleria si sono evidenziati tratti con tracce di umidità e venute d'acqua e totale assenza di malta tra i blocchi di pietra; inoltre in numerose zone di rivestimento c'è presenza di scaglie dovute a schiacciamento del materiale per superamento della resistenza a compressione del materiale a causa della dissimmetrica distribuzione delle tensioni.

Carotaggi e indagini a distruzione eseguiti in galleria hanno permesso di individuare uno spessore del rivestimento piuttosto regolare compreso tra i 40 e i 90 cm, eccetto locali zone di irregolarità in corrispondenza dei contatti tra litotipi differenti, e zone di vuoti, dell'ordine dei 20 - 50 cm, alle spalle del rivestimento legati principalmente a fenomeni di carsismo, che hanno provocato incidenti dovuti anche al cedimento del piano stradale per presenza di vuoti di dimensioni non trascurabili in corrispondenza del sottofondo.

Inoltre, in una nicchia scavata in prossimità della progressiva 489 m (da imbocco francese) è stata eseguita una misura di martinetto piatto direttamente sull'ammasso di anidride affiorante (presente, in sostanza, in tutto il tratto francese), le misure in questo caso hanno fornito tensioni comprese tra 16 e 27 MPa.

L'ultimo grave dissesto all'interno dell'attuale traforo stradale è datato 3 marzo 1989. Durante lo scavo di allargamento per la realizzazione di una piazzola, al fine di adeguare la galleria alle evolute condizioni di traffico, in prossimità della progressiva 1400 (a circa 100 metri dal confine con la Francia), dopo un avanzamento di 17 m, si è verificato sul lato di calotta e piedritto Ovest uno sfornellamento di circa 650 m³ di roccia. La chiusura del traffico fu totale per i tre mesi necessari a portare a termine i lavori di ripristino che sono stati eseguiti montando un tubo di acciaio di sezione opportuna e spingendolo nella cavità della frana allo scopo di fornire protezione durante il lavoro e di fungere da cassero per la successiva iniezione, alle spalle, di una miscela cementizia espansa. Portata a termine l'iniezione, il tubo fu smontato e si procedette a riscavare fino alla sezione di progetto.

2. IL PROGETTO DEL NUOVO TUNNEL DEL COL DI TENDA.

2.1 Introduzione

Nonostante che all'epoca sia stato valutato come un prodigio della tecnica e abbia svolto, per oltre un secolo, l'importante funzione di collegamento tra il Piemonte e Nizza, per il Traforo del Col di Tenda è arrivato il momento di adeguarsi alle attuali esigenze di sicurezza che la circolazione stradale esige.

Il progetto del nuovo tunnel nasce dalle indicazioni espresse dalla Commissione Intergovernativa per il Miglioramento dei Collegamenti Franco-Italiani nelle Alpi del Sud (CIG) per la quale "la sicurezza del tunnel stradale del Tenda rappresenta una priorità assoluta.."

Attualmente il traffico bi-direzionale all'interno dell'unica canna è gestito con senso unico alternato per i mezzi pesanti mentre è continuo per i mezzi leggeri; tale situazione pone la circolazione a elevato rischio nei riguardi della sicurezza.

Pertanto, sin dalla riunione del 30 luglio 2001 d'insediamento della CIG si procedeva all'esame delle soluzioni progettuali elaborate nell'anno 2000 dal gruppo di lavoro Italo-Francese (ANAS-DDE-CETu) per la messa in sicurezza e la ricostruzione del tunnel stradale del Colle di Tenda.

Nella riunione del 17 ottobre 2003 la CIG decideva per la costituzione di un gruppo di lavoro dedicato allo sviluppo del progetto preliminare dell'opera costituita da due tubi mono-direzionali a una corsia di traffico di sezione definita, secondo le due ipotesi di lavoro seguenti:

- una configurazione basata su due gallerie mono-direzionali ad una corsia di traffico con la realizzazione di una canna nuova e l'alesaggio del tunnel esistente (detta soluzione "Alta");
- una configurazione con gallerie nuove mono-direzionali ad una corsia di traffico, il cui arrivo lato francese si situa al di sotto dei tornanti (detta soluzione "Bassa").

Il 19 marzo 2004 la CIG definiva il Mandato del Gruppo di Lavoro e ne costituiva gli elementi.

I due capi delegazione, incaricati dal Mandato stesso di realizzare e firmare il progetto preliminare, l'ing. L. Bollotte per DDE e l'ing. A. Valente per ANAS, si sono avvalsi delle rispettive strutture, che per la parte italiana è rappresentata dalla Direzione Centrale Progettazione di Roma dell'ANAS.

La CIG, al termine dell'esame dei progetti presentati dal gruppo di lavoro, ha indicato come preferibile la soluzione "Alta"; tale decisione è confermata nell'aprile seguente dal Ministro italiano e da quello francese e viene dato mandato di procedere con le attività di progettazione e di acquisizione dei permessi necessari per l'avvio dei lavori nei due paesi.

Nel corso della stessa riunione si è deciso di procedere a un appalto unico che comprendesse tutti i lavori previsti, sia in sotterraneo sia all'aperto, sia in territorio italiano sia in quello francese. Si è affidata all'Italia la responsabilità di procedere alle attività di gara d'appalto, di affidamento dei lavori e di controllo degli stessi secondo un rapporto internazionale regolato da un trattato redatto ad hoc. In sostanza, si è deciso che, una volta acquisiti tutti i pareri e le autorizzazioni delle rispettive nazioni, il progetto definitivo sarebbe stato redatto, nella sua forma finale, dall'ANAS per essere messo in gara secondo gli standard e le normative italiane.

2.2 Il progetto definitivo.

Il progetto è stato realizzato interamente dalla struttura tecnica dell'ANAS e riguarda l'adeguamento e raddoppio del tunnel del Col di Tenda. La soluzione progettuale adottata prevede la realizzazione di una nuova galleria naturale in affiancamento alla esistente, e l'allargamento dell'attuale traforo. Le due canne avranno un interasse di 30 metri e saranno tra loro collegate da bypass pedonali e carrabili.

Le caratteristiche di progetto sono state determinate tenendo conto delle esigenze manifestate dalla CIG.

La sezione trasversale presenta i seguenti parametri:

- piattaforma stradale carrabile di 6,5 metri di larghezza complessiva
- banchina in sinistra di 30 cm,
- una corsia di marcia di 3.50 m
- una corsia di emergenza di 2.70 m.
- altezze libere garantite, misurate sulla verticale, saranno rispettivamente: 4,80m – 5,00m – 4,80m.

La sezione è completata dalla presenza di elementi marginali su entrambi i lati della galleria, costituiti da marciapiedi destinati alla posa in opera delle componenti impiantistiche (figura 9). Particolare attenzione è stata posta sul tema della sicurezza; il progetto prevede l'esercizio della canna esistente durante i lavori di realizzazione della nuova e lo spostamento del traffico sulla nuova durante i lavori di alesaggio dell'esistente. Questa configurazione ha comportato una studio ad hoc delle problematiche legate alla sicurezza e delle dotazioni impiantistiche. Tutto quanto è stato riassunto in un "documento di sicurezza" in cui

è stata condotta una analisi di rischio sulla base della normativa europea e in accordo con le "Linee guida per la progettazione della sicurezza nelle gallerie stradali" emanate dall'ANAS. Tale documento infine è stato approvato dal comitato di sicurezza della CIG.

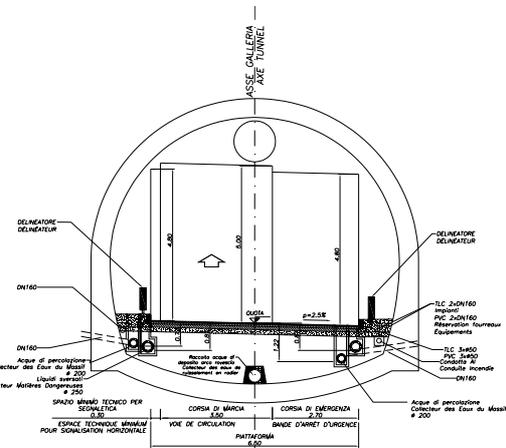


Figura 9 – Sezione tipo del nuovo tunnel

2.3 Studi e Indagini (fase conoscitiva)

In corrispondenza del Col di Tenda affiorano i termini litologici sedimentari delle Unità Sud-Brianzonese e Delfinese ed il limite di origine tettonica tra le due unità strutturali segue approssimativamente la linea di confine tra Italia e Francia. In territorio francese, infatti, affiorano essenzialmente terreni appartenenti alla serie esterna, "parautoctona" del Delfinese che vengono localmente distinti con il termine di Unità di Cannelle; lungo il versante italiano si ritrovano, invece, terreni appartenenti al dominio sub-brianzonese che sono attribuiti nella letteratura geologica all'Unità del Col di Tenda. Questi ultimi si sovrappongono ai primi in corrispondenza di un piano di sovrascorrimento a vergenza meridionale conosciuto come "Sovrascorrimento del Col di Tenda" (figura 10).



Figura 10 - Zona del sovrascorrimento del Col di Tenda

Nell'area d'interesse dell'opera gli affioramenti rocciosi più significativi sono rappresentati dalle potenti formazioni flyschoidi cenozoiche (Eocene – Oligocene), costituite da alternanze ritmiche di scisti argillosi e arenacei e da calcari argillosi e filladici. Inseriti entro questa formazione, per contatto tettonico di sovrascorrimento o di faglia, sono presenti grosse bancate di calcari e calcari dolomitici Giurassici e masse evaporitiche costituite da anidridi, gessi e carniole ascrivibili al Trias. (vedi figura 12). In superficie sono infine presenti coltri di copertura rimaneggiate e formazioni moreniche, come ad esempio nella zona di imbocco sul versante italiano.

Nelle fasi di progettazione della nuova galleria del Col di Tenda si è attentamente valutata la possibilità di interferenza diretta e/o indiretta con il bacino acquifero che alimenta la sorgente dell'acquedotto delle Langhe posta all'interno della galleria ferroviaria che corre a quota più bassa dell'attuale tunnel stradale.

Riguardo al livello piezometrico si può affermare, che la zona di minima saturazione dell'ammasso è attestata a quota 1320 metri s.l.m., essendo ciò confermato dalle perforazioni e dalle osservazioni eseguite. Sulla base dei dati a disposizione – che sono continuamente aggiornati dai monitoraggi in corso – non è possibile stabilire l'esistenza di un livello piezometrico continuo ed esteso fino all'attuale galleria stradale, tuttavia si prevede che lo scavo interessi in diversi punti la falda per i primi 800 m circa dall'imbocco italiano (vedi figura 11).

Per rispondere a tale interferenza, nella fase di progettazione definitiva, si è cautelativamente stabilito l'utilizzo di una sezione di scavo completamente impermeabilizzata per tutto il tratto di interesse dell'acquifero, in modo tale da ridurre al minimo un eventuale drenaggio delle acque che potrebbe essere indotto dalla galleria.

Oltre ad aver fatto riferimento alle numerose indagini eseguite sul versante francese dal CETu (Centre Etude des Tunnel) dai primi anni '70 e alle indagini eseguite sul versante italiano negli anni successivi, per la redazione del progetto preliminare, sono state svolte numerose indagini geognostiche.

Inoltre, a integrazione di quanto svolto nel corso del Progetto Preliminare e nelle successive fasi di studio sono state eseguite per la redazione del progetto definitivo, le seguenti indagini:

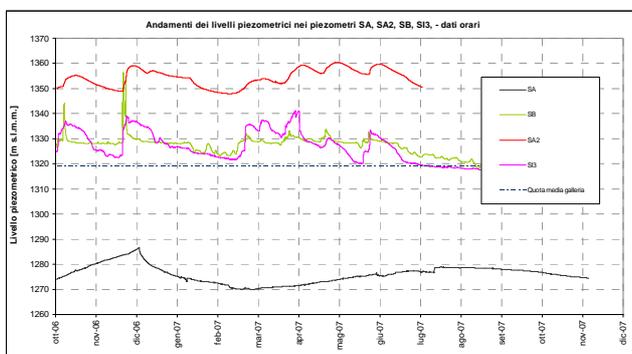


Figura 11 - Andamento dei livelli piezometrici nei fori di sondaggio monitorati

- Rilievi geologici di dettaglio in superficie in 12 siti rappresentativi per l'analisi strutturale dell'ammasso roccioso: orientazione, tipo di discontinuità, condizione delle discontinuità, spaziatura;
- 39 Sondaggi geognostici a carotaggio continuo in galleria e 4 Sondaggi profondi in corrispondenza della nuova galleria che hanno permesso di ricostruire l'assetto stratigrafico e geomeccanico della zona direttamente interessata dallo scavo.
- 4 stendimenti sismici in corrispondenza dell'imbocco Nord che hanno permesso di ricostruire l'area in cui sarà realizzata l'opera;
- Studio di un affioramento visibile all'interno del tunnel stradale esistente in corrispondenza della progressiva 489 m da imbocco francese;
- Indagini idrogeologiche integrative per la ricostruzione nel tempo dei fenomeni sotterranei, analisi delle portate storiche, monitoraggio continuo dei principali parametri fisici della Sorgente, monitoraggio continuo della torbidità, monitoraggio continuo della falda, analisi chimica delle acque superficiali e sotterranee, analisi con traccianti chimici;
- prove di laboratorio su provini ricavati da sondaggi a carotaggio continuo: 71 per la determinazione della resistenza a compressione monoassiale, 93 per la determinazione della resistenza a carico puntuale, - - 164 per la determinazione del peso per unità di volume;
- 46 colonne stratigrafiche ricavate anch'esse dai sondaggi a carotaggio continuo esterni e in galleria esistente;
- Indagini di scansione laser e georadar in galleria esistente che hanno contribuito a fornire elementi utili sullo stato attuale dell'opera in funzione del suo allargamento.

A seguito dell'analisi dei dati ottenuti sono state individuate le zone o tratte di galleria geotecnicamente omogenee che saranno

interessate dallo scavo e i relativi parametri geotecnici necessari alla progettazione (deformabilità, resistenza, permeabilità); in tal modo è stato possibile suddividere l'ammasso nelle seguenti tratte omogenee (partendo dal lato Italia):

- Detrito di origine morenica a granulometria ghiaiosa
- Flysch di origine eocenica intensamente fratturato
- Calcari intensamente fratturati e frantumati
- Flysch di origine eocenica
- Anidriti compatte
- Carniole localmente pulverulente e fango

2.3.1 Il profilo geomeccanico

In figura 13 è riportato il profilo geomeccanico del nuovo Tunnel del Tenda, elaborato grazie ai dati disponibili, mentre in figura 14 è riportata una descrizione fotografica delle litologie investigate.

Come è riscontrabile dal profilo, l'imbocco Italiano si intesta nella formazione morenica, composta da materiale prevalentemente sciolto a granulometria ghiaiosa con clasti eterometrici, e con probabile sede di falda freatica come evidenziato in alcuni piezometri. All'incirca alla progressiva 0+450 la galleria interessa i termini litostatici sottostanti costituiti dai Flysch Eocenici, fortemente fratturati a causa della intensa tettonizzazione, entro i quali rimane fino all'incirca alla progressiva 0+700. Procedendo verso la Francia s'incontrano le formazioni calcaree eoceniche e giurassiche facenti ancora parte del dominio interno sub-brianzone; anche queste formazioni risultano fortemente tettonizzate e rappresentano la principale sede dell'acquifero delle langhe. Attorno alla progressiva 1+000 si incontra il sovrascorrimento che divide i due domini geologici e la galleria procede nella formazione del flysch sottostante costituita da peliti ed argilliti con alternanze arenacee; tale unità litologica risulta localmente tettonizzata con presenza di fasce cataclasate in prossimità delle principali lineazioni tettoniche individuate. La galleria procede in questa formazione fino ad oltrepassare la linea di confine con la Francia ed all'incirca alla progressiva 2+450 incontra la formazione triassica delle anidriti che all'analisi delle carote di sondaggio appare compatta, scarsamente fratturata, e con ottime caratteristiche meccaniche. In tale tratta si prevede la possibilità che nel tempo la roccia possa rigonfiare in presenza di acque di infiltrazione ed aumentare sensibilmente il carico agente sul rivestimento definitivo. Infatti due delle centine poste in opera nel 1973 sono state attrezzate con martinetto piatto per la misura dei carichi sopportati dal rivestimento (i risultati, espressi in kg, sono riportati in figura 12), si nota un'aumento nel tempo dei carichi, sia nella zona del flysch sia in quella delle anidriti, ma per cause differenti nei due casi. Infatti, se nelle anidriti questo è dovuto al rigonfiamento, (fenomeno già segnalato dagli autori dell'epoca, i progettisti inizialmente non ritenevano necessario il rivestimento della roccia viste le buone qualità meccaniche, ma nel tempo si sono dovuti ricredere quando si sono presentati i primi segni della progressiva tendenza del cavo a chiudersi), nel flysch è dovuto invece al distacco di blocchi di materiale che gravano puntualmente sul rivestimento.

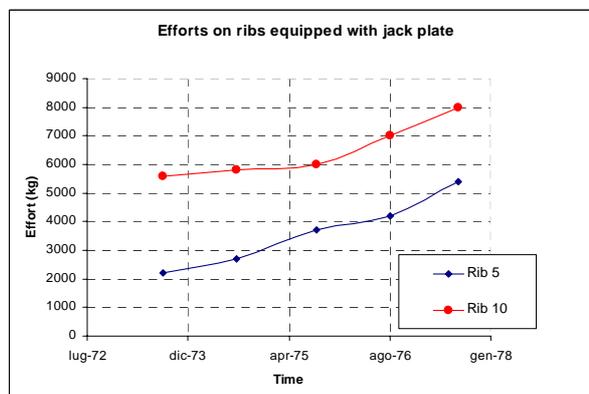
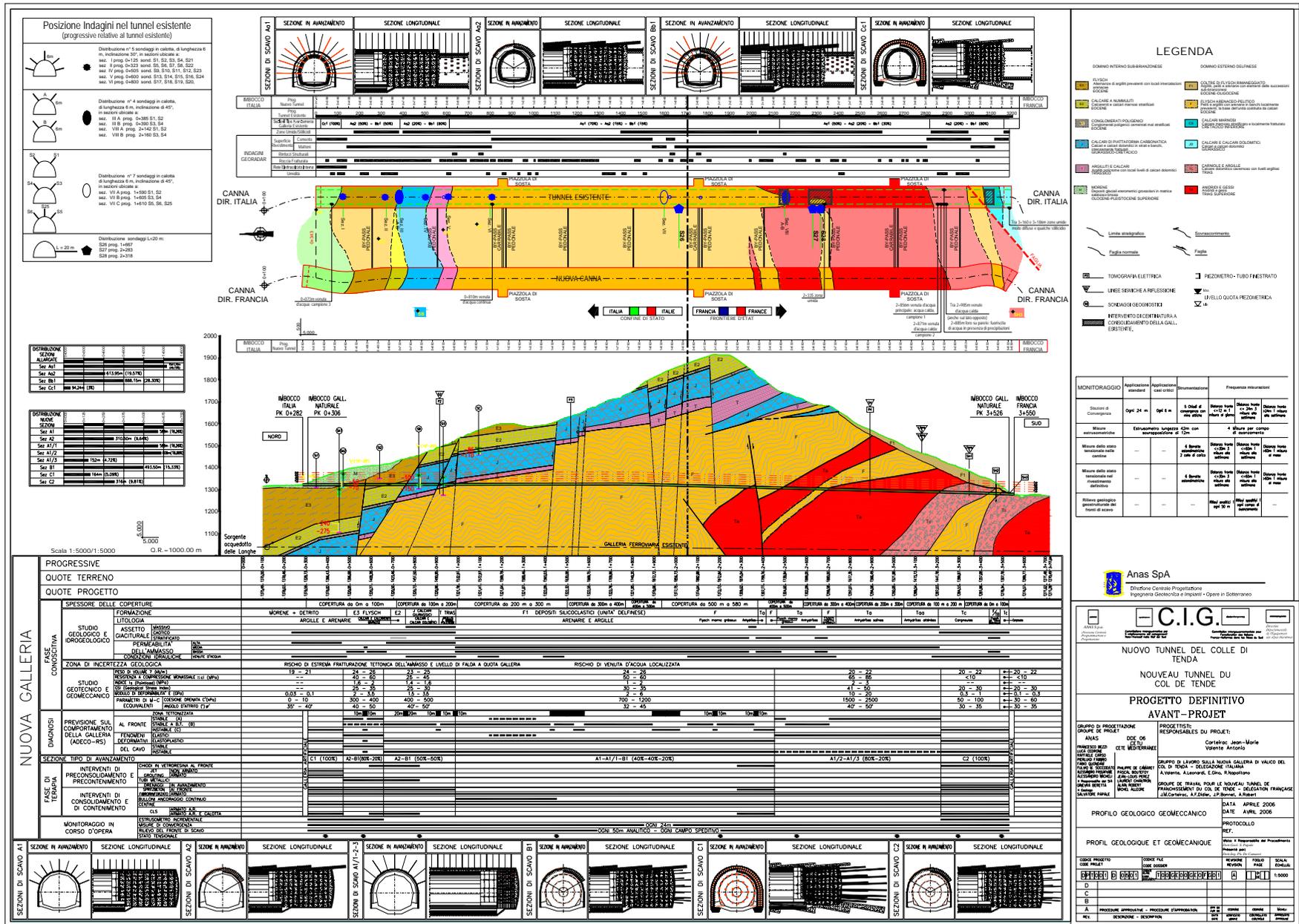


Figura 12 – Misure con martinetto piatto in due centine appositamente attrezzate



LEGENDA



Figura 14 – Descrizione fotografica litologie investigate

Tale tendenza è confermata anche dalle analisi dei profili del tunnel che evidenziano un punzonamento della volta nella zona del flysch e uno schiacciamento nella zona delle anidriti. per mantenere livelli di carico accettabili sui rivestimenti nella zona delle anidriti si prevede di realizzare un sovrascavo che permetta di dissipare una parte del rigonfiamento prima di mettere in carico il rivestimento.

Nella tratta finale, avvicinandosi all'imbocco francese, si rinviene l'ultimo litotipo che corrisponde ai calcari vacuolari e cavernosi delle Carniole, nei quali si prevede lo scavo con una sezione fortemente consolidata a causa delle scarse caratteristiche meccaniche riscontrate in questo materiale.

2.4 Analisi delle problematiche progettuali (diagnosi e terapia)

Durante lo sviluppo del progetto si è fatto ricorso all'analisi numerica per lo studio delle sezioni adottate nei diversi quadri geomeccanici di riferimento (in tabella 1 sono riportate le macrofasi di modellazione considerate per il calcolo; esse si suddividono in altre sottofasi per un numero totale di 20).

Di seguito viene riportata la descrizione del modello utilizzato nell'analisi della sezione di tipo C1 utilizzata in condizioni di particolare criticità anche per la presenza di falda e applicata nella zona posta nei pressi dell'imbocco Nord (Italia). Nell'analisi è stata presa in considerazione una zona limitata intorno allo scavo che si estende per 112 m lateralmente all'asse della galleria e a partire dalla superficie raggiunge la profondità di 70 m; la copertura è assunta pari a 20 m.

Tali dimensioni sono state scelte allo scopo di garantire il rapporto consigliato (Itasca 1998) fra le dimensioni della griglia e la

larghezza dello scavo e al fine di minimizzare gli effetti di bordo. La griglia di discretizzazione è costituita da elementi quadrilateri le cui dimensioni sono state opportunamente ridotte in prossimità della posizione delle gallerie al fine di ottenere un adeguato grado di dettaglio.

Il movimento dei nodi sul fondo è impedito sia in direzione verticale che orizzontale, mentre i nodi posti sui due contorni laterali sono fissati in direzione orizzontale.

I vari strati sono considerati omogenei e per essi si assume, nell'analisi, un modello costitutivo di tipo elastico lineare-plastico perfetto, con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb.

FASE 1: Stato litostatico considerando la quota della falda al di sotto del piano stradale	
FASE 2: Modellazione della galleria esistente eseguita in due time successive con discretizzazione del rivestimento in muratura	
FASE 3: Modellazione della nuova galleria eseguita in sette time successive al fine di riprodurre fedelmente tutte le fasi costruttive	
FASE 4: Modellazione dell'allargamento della galleria esistente eseguita in sette time successivi al fine di riprodurre tutte le fasi di realizzazione	
FASE 5: Risalita della quota della falda al di sopra delle gallerie	

Tabella 1 - Fasi di modellazione

In tabella 2 sono riportati i parametri adottati nell'analisi numerica per i terreni naturali, mentre in figura 15 è riportata la geometria della griglia con le condizioni di vincolo al contorno.

Tipo di terreno	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)	E' (MPa)	ν'	K_0
Morene	20	5	38	20 - 70	0,3	0,5
Flysch Inf	25	300	45	3000	0,3	0,5

Tabella 2 - Parametri meccanici dei terreni

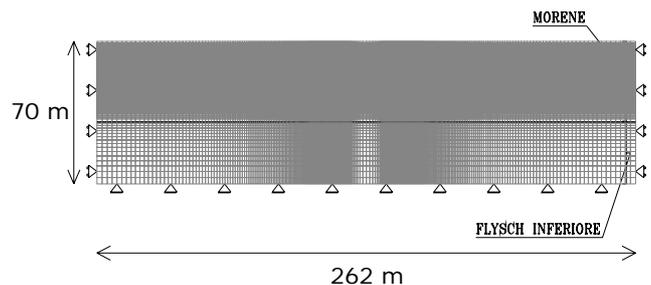


Figura 15 - Geometria della griglia e condizioni di vincolo

Lavorando in modalità groundflow si sono dovute introdurre anche le proprietà idrauliche dei materiali ed in particolare la porosità e la permeabilità.

All'interno della Fase 2 è stato modellato il rivestimento in muratura della galleria esistente avente uno spessore di circa 50 cm. (figura 16). La discretizzazione è avvenuta attraverso una generazione radiale della mesh con elementi di dimensione pari a circa 10 cm. Inoltre sono stati introdotti i parametri di resistenza e rigidezza per il rivestimento in muratura (tabella 3). E' stata inoltre utilizzata una interfaccia (di opportuna rigidezza normale e di taglio) tra rivestimento in muratura e terreno naturale al fine di garantire una corretta modellazione dell'interazione terreno struttura.

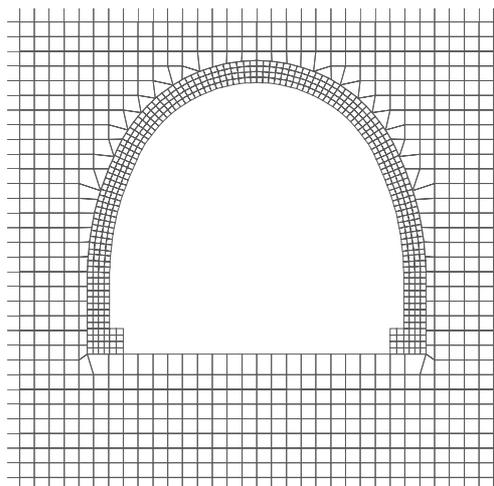


Figura 16 - Discretizzazione del rivestimento in muratura

Tipo di materiale	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)	E' (MPa)	ν
Muratura in pietra	18	1000	30	30000	0,15

Tabella 3 - Parametri rivestimento in muratura

Nella fase successiva si è passati all'analisi dello scavo della nuova galleria (figura 17); gli interventi al contorno (jet grouting) sono stati considerati nel modello attraverso un miglioramento delle caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno circostante il nuovo tunnel. La definizione di tali caratteristiche nel terreno trattato in jet grouting è stata effettuata attraverso l'utilizzo delle relazioni riportate in figura 18.

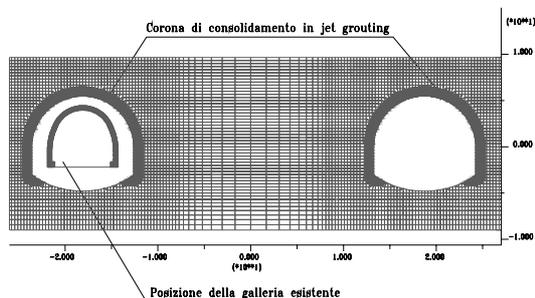


Figura 17 – Fase di analisi dell'allargamento della galleria esistente

Ai fini dell'analisi numerica si è assunto che l'effetto del consolidamento produce un incremento di coesione efficace, valutato attraverso il cerchio di Mohr. Nella tabella 4 sono riportati i parametri del terreno consolidato adottati nella modellazione.

Le diverse fasi costruttive sono state riprodotte fedelmente nell'analisi ricavando le convergenze del cavo e le sollecitazioni agenti sul rivestimento in funzione della distanza dal fronte di scavo e, di conseguenza, del tempo di realizzazione dell'opera. In questo modo è stato possibile eseguire le verifiche dei rivestimenti in ciascuna fase costruttiva: verifica del priverstimento in quattro *time* di maturazione, verifica del rivestimento definitivo in due *time* di maturazione, verifica del rivestimento dopo il decadimento del priverstimento e della fascia di terreno consolidato. Durante queste fasi costruttive sono state monitorate le tensioni agenti sul rivestimento in muratura della galleria esistente al fine di valutare un'eventuale interazione tra il nuovo e il vecchio tunnel. Il risultato ha mostrato come la distanza tra le due canne è stata opportunamente dimensionata al fine di evitare ripercussioni sul tunnel esistente dovute allo scavo del nuovo. Questo aspetto è di particolare importanza in quanto una canna sarà sempre in esercizio durante lo scavo dell'altra. Nella Fase 4 si è passati alla

modellazione dell'allargamento della galleria esistente sono stati ripercorsi tutti i passi seguiti nella fase precedente ricavando, anche in questo caso, le convergenze del cavo e le sollecitazioni sui rivestimenti nelle diverse fasi di realizzazione

Terreno	Diametro (m)			Resistenza a Compressione σ_c (MPa)	E (MPa)
	Sistema Monofluido	Sistema Bifluido	Sistema Trifluido		
Ghiaia	0.7-1.1	1.0-1.5	2.0-2.4	5-30	2500-15000
Sabbia ghiaiosa	0.5-1	0.7-1.5	1.5-2.0	5-20	2500-10000
Sabbia limosa	0.5-0.9	0.7-1.3	1.2-1.6	5-15	2500-7500
Limo sabbioso	0.4-0.6	0.6-0.9	1.0-1.5	2-10	1000-5000
Argille N.C. ($c_u < 50$ kPa)	0.3-0.6	0.5-1.0	0.8-1.2	1-10	500-5000

$$c' = \frac{\sigma_{cd}}{2Nf^{0.5}} \quad Nf = \frac{(1 + \sin \varphi')}{(1 - \sin \varphi')}$$

Figura 18 – Relazioni adottate per ricavare parametri di resistenza e rigidità in terreni consolidati mediante jet-grouting.

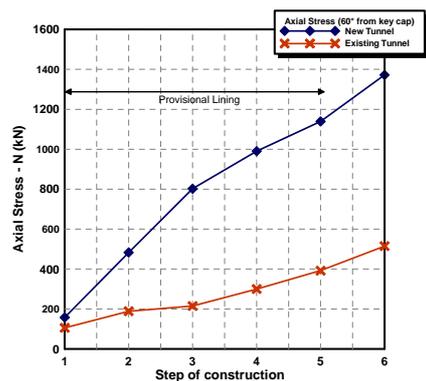
Tipo di terreno	c' (kPa)	φ' (°)	E' (MPa)	ν (-)
Muratura in pietra	2000	38	2500	0,3

Tabella 4 - Parametri meccanici del terreno consolidato

Anche in questo caso sono state controllate anche le sollecitazioni agenti sul rivestimento del tunnel adiacente allo scopo di valutare gli effetti indotti dall'allargamento della galleria. È stato pertanto possibile asserire che gli effetti indotti dall'allargamento della galleria si estinguono a una distanza inferiore rispetto a quella di progetto tra le due canne.

Nella Fase 5 viene modellata la risalita della quota di falda in accordo con le letture piezometriche; in questo modo viene schematizzata la situazione più gravosa per i rivestimenti delle gallerie; le quali sono state completamente impermeabilizzate al fine di evitare interazioni durante il ripristino delle condizioni di regime della falda.

Si è inoltre osservato come il carico agente sui rivestimenti provvisori e definitivi sia diverso nel caso si parli di alesaggio della canna esistente oppure di scavo completo della nuova, infatti nel primo caso le sollecitazioni assiali e flettenti risultano di minore entità per via del detensionamento già avvenuto nell'intorno del tunnel esistente, i grafici riportati in figura 19 mostrano l'entità di tale differenza. Tale comportamento non è da intendersi come generale per questo tipo di problematiche ma è un risultato plausibile dell'analisi condotta nelle specifiche condizioni considerate e modellate nel progetto in esame.



- Step 1: Installation provisional lining
- Step 2: Spritz-beton Rck 13 MPa
- Step 3: Spritz-beton Rck 19 MPa
- Step 4: Spritz-beton Rck 25 MPa + Installation reverse arch E=25 GPa
- Step 5: Reverse arch E=30 GPa + arch E=30 GPa
- Step 6: Decay provisional lining

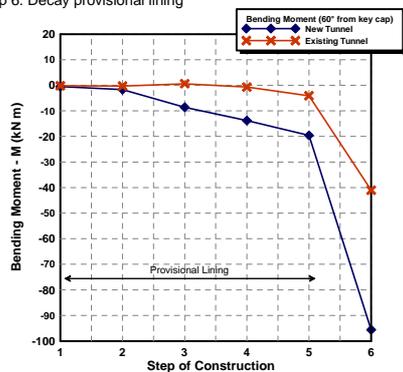


Figura 19 – Entità degli sforzi normali (in alto) e dei momenti flettenti (in basso) nelle due canne della galleria

Bibliografia

- BALDACCI L., FRANCHI S. (1900) - "Studio geologico della galleria del Colle di Tenda (linea Cuneo - Ventimiglia)". Boll. R. Com. Geol. It. Vol I, pp 57.
- SACCO F. (1905) - "Le sorgenti della Galleria Ferroviaria del Colle di Tenda". Giorn. Geol. Pratica, anno IV, fasc. I, Torino, pp 11-36.
- BIENIAWSKI Z.T.: "Engineering classification of jointed rock masses" - Transactions, South Africa Institution of Civil Engineers. (1993).
- BIENIAWSKI Z.T.: "Geomechanics classification of rock masses and its application to tunneling". Proc. 3rd Int. Congr. Rock Mechanics, ISRM, Denver. (1974).
- BIENIAWSKI Z.T.: "Determining rock mass deformability - experience from histories". Int. J. Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, (1978).
- BIENIAWSKI Z.T.: "Rock mechanics design in mining and tunnelling". Balkema, Rotterdam, (1984).
- BIENIAWSKI Z.T.: "Engineering rock mass classifications". J. Wiley & Sons, (1989).
- HOEK, E. - BROWN E.T.: "Underground excavation in rock". - Institution of Mining and Metallurgy, London (1982)
- HOEK, E. - BROWN E.T.: "Practical estimates of rock mass strength" - International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
- HOEK, E.: "Rock Engineering" (1998)
- HOEK E. - DIEDERICHS M.S.: "Empirical estimation of rock mass modulus" - International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 43, (2006).
- BALDACCI L., FRANCHI S. (1900) - "Studio geologico della galleria del Colle di Tenda (linea Cuneo - Ventimiglia)". Boll. R. Com. Geol. It. Vol I, pp 57.
- SACCO F. (1905) - "Le sorgenti della Galleria Ferroviaria del Colle di Tenda". Giorn. Geol. Pratica, anno IV, fasc. I, Torino, pp 11-36.
- CETu: "Rapport de synthèse sur le comportement du Tunnel de Tende". (1978).
- CETu: "Tunnel du Col de Tende. Synthèse des reconnaissances, actualisation 1987". (1987).
- LABORATOIRE CETE: "Tunnel Routier de Tende. Synthèse des essais de laboratoire". (1978).
- SZECHY K.: "The Art of Tunnelling". Budapest (1970).
- FREDERICK W.: "Practical Tunnelling" - Londra (1860).
- GRANDIS S. - GRATTONI S. - SOMMEILLER G.: "Traforo delle Alpi tra Bardonecché e Modane. Relazione della Direzione Tecnica alla Direzione Generale delle Strade Ferrate dello Stato. Torino (1863).
- GALLENGA A. "Storia del Piemonte dai primi tempi alla pace di Parigi del 1856". Torino (1856).
- G.P.CAVINATO, E. DI LUZIO, MOSCATELLI, VALLONE, M. AVERARDI, A. VALENTE, S. PAPA. "The new Col di Tenda tunnel between Italy and France: integrated geological investigations and geophysical prospections for preliminary studies on the Italian side". Engineering Geology 88 - 2006.
- LUNARDI P. Progetto e Costruzione di gallerie - Hoepli
- CROSETTI A. "Nell'antica contea di Tenda, la strada e i traffici"